引用格式：夏军，林忠辉，占车生，等. 长江流域水生态调度与长江模拟器研发. 中国科学院院刊, 2023, 38(12): 1767-1780, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20230927001.
Xia J, Lin Z H, Zhan C S, et al. Ecological operation in Yangtze River basin with Yangtze River Simulator. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(12): 1767-1780, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20230927001. (in Chinese)

长江流域水生态调度与长江模拟器研发

夏　军[1,2]　林忠辉[2*]　占车生[2]　高文娟[3]　李云良[4]　姚　静[4]　曾思栋[5]　黄仁勇[6]　王洪铸[3]

1 武汉大学　水资源与水电工程科学国家重点实验室　武汉　430072
2 中国科学院地理科学与资源研究所　中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室 北京　100101
3 中国科学院水生生物研究所　淡水生态与生物技术国家重点实验室　武汉　430072
4 中国科学院南京地理与湖泊研究所　南京　210008
5 中国科学院重庆绿色智能技术研究院　重庆　400714
6 长江科学院　武汉　430010

摘要　长江流域的生态保护和绿色发展，是实现美丽中国生态建设的重要内容。文章首先梳理了长江流域上中下游和典型通江湖泊水生态面临的主要问题，并分析了长江流域现有水生态调度实践所取得的成果及其不足；其次概述了近5年来长江模拟器研发的进展，以及长江模拟器在干流河道和通江湖泊水生态调度方面的初步设计；通过长江模拟器进行的干流河道和通江湖泊水文-水动力-水生态耦合模拟实践，初步获得了满足干流典型河段水生态需求的三峡水库生态调度优化方案；最后对长江流域水生态调度的方向和进一步发展长江模拟器提出了建议。

关键词　长江流域，长江模拟器，水生态，生态调度

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.20230927001
CSTR　32128.14.CASbulletin.20230927001

党的十八大以来，党中央把推进生态文明建设放在突出位置，2018年3月，十三届全国人大一次会议通过宪法修正案，将新发展理念、生态文明和建设美丽中国的要求载入宪法，确立了生态文明的宪法地位。构建生态文明体系，完善生态文明领域的统筹协调机制，促进经济社会发展的全面绿色转型，是“十

*通信作者
资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA23040000）
修改稿收到日期：2023年11月26日

四五”期间国家发展的重要任务。

2014年，长江经济带建设成为新时期国家发展重大战略。2016年、2018年、2020年、2023年，习近平总书记先后在重庆、武汉、南京、南昌主持召开推动长江经济带绿色发展座谈会，确定了“共抓大保护、不搞大开发”，“生态优先、绿色发展”的整体方针，突显了长江经济带高质量绿色发展在国家生态文明建设中的战略地位。2019年以来，生态环境部、国家发展和改革委员会联合开展了长江保护修复攻坚行动计划，流域水环境质量得到明显改善，水生态退化得到初步遏制，但面源污染控制不力、湖泊湿地萎缩、生物多样性损失等问题依然突出。受气候变化和人类活动的影响，未来长江流域生态保护形势依然严峻复杂，水环境治理和水生态修复任务依然面临巨大挑战。2021年3月1日，《中华人民共和国长江保护法》正式实施。贯彻落实《长江保护法》，在科学统筹的前提下进行流域系统治理，最终实现长江流域生态优先下的高质量绿色发展，有2项重要工作需要尽快开展：① 国家层面的全流域协调机制要尽快建立，② 加强科技创新的引领作用，支撑流域生态环境修复保护和综合管理的流域水系统模拟调控装置需要尽快建设。

针对全球变化带来的生态与环境问题，国内外学者提出和发展了一系列地球系统模型（ESMs）。以全球大气动力学模式为基础，耦合海洋、陆地、冰冻圈等动力学模式，旨在预测、重构和深入理解全球气候变化过程，评估气候变化对生态和环境的影响。2002年3月，日本建成地球模拟器（ES）[1]，目前已发展至ES4版本。2012年，美国国家大气海洋局地球物理流体动力学实验室开发了地球系统模型（ESMs）[2]。2018年，美国能源部主导发布了E级能源地球系统模型（E3SM）[3]，关注点除气候变化预测外，还将评估气候变化对能源基础设施带来的压力。2020年，瑞士大气和气候科学研究所发展了一个模块化地球系统模拟器（MESMER）[4]。2010年，曾庆存等[5]针对国际上地球系统动力模式研究的趋势，提出发展我国的地球系统动力学模式。2022年10月，中国科学院大气物理研究所联合清华大学，正式建成“地球系统数值模拟装置”，对深入理解气候变化对全球及中国区域环境的影响意义重大。2021年，于贵瑞等[6]提出打造“陆地生态系统数值模拟器”，发展基于“多源数据分析—生态过程模拟—时空格局评估—生态预测预警”于一体的大陆尺度的陆地生态系统模拟分析装置，作为中国国家生态系统观测研究网络的重大基础设施建设内容。但现有的地球系统模拟器侧重于整个地球系统的刻画，空间分辨率较粗。例如，“地球系统数值模拟装置”的最高空间分辨率目前为5 km，不能精细刻画地面生态水文过程，也不能精细刻画人为活动与管理措施对流域生态水文过程的影响，而这些过程的精细模拟对流域水环境水生态的评估、预警、调控必不可少。

2019年初，中国科学院启动了“美丽中国生态文明科技建设工程”战略性先导科技专项（A类），其中项目4“长江经济带干流水环境水生态综合治理与应用”主要针对以水为纽带的长江经济带高质量绿色发展所亟待解决的水生态和水环境问题。研究团队率先提出“长江模拟器”构想，在流域信息空天地一体化监测基础上，发展流域水系统综合模拟系统，为流域水系统调控和统筹管理提供综合的技术方案[7,8]。本文主要针对长江流域水生态问题进行剖析，介绍了长江模拟器在流域水生态调度方面的研究和模拟实践，期望为长江流域水生态调度管理提供参考。

1 长江流域水生态现状与主要问题

长江水系具有十分重要的生态服务功能，是中华民族永续发展的重要支撑[9]。长江流域水生生物多样性甚高，有鱼类400余种（淡水348种，特有166种）、两栖动物145种（特有49种）、软体动物296种（特有

197种）、水生维管束植物298种，是十分重要的种质资源库，支撑流域淡水鱼产量超过全国的70%，为世界的40%。受强烈的人类活动和气候变化的综合影响，长江流域正面临着部分区域水资源短缺、水污染严重、水生态受损等问题，成为制约区域社会可持续发展的重要因素。5万余座水库总库容占到了全流域地表径流总量的37%，极大地改变了长江流域水循环特征和水生生物栖息地环境。

长江流域水生态的主要问题，突出表现为水生生物多样性下降。目前，长江流域白鱀豚、白鲟等珍稀物种基本灭绝，不少鱼类（约30%）、鸟类、贝类等动物濒危；中华鲟、达氏鲟、胭脂鱼、四大家鱼等卵苗量大幅减少，江湖捕鱼产量近50年下降了近80%；江豚数量近20年减少了80%，现仅存1 249头。长江流域水生态问题在上中下游有不同的表现，概括为4个方面。

1.1 上游梯级水库群引起的水生态问题

长江上游流域水能资源丰富，金沙江中下游梯级水库群、雅砻江流域梯级水库群已陆续建成，为国家经济社会发展提供了稳定的能源支持。但梯级水库群建设也显著改变了水生生物的生境，突出表现为2个主要问题。

（1）总溶解气体过饱和问题对鱼类的影响持续存在。高坝运行使得总溶解气体（TDG）过饱和成为一个严重的水环境问题。2014年，溪洛渡坝下持续1周多的TDG过饱和水流导致下游向家坝库区 10×10^4 kg鱼类死亡。而梯级水库群联合调度可导致TDG过饱和持续时间长，以及过饱和水平较高的累积效应。采用流动动力学模型模拟预测TDG过饱和的发生分布，优化水电站发电模式和运行调度方式，是目前解决梯级水库群高坝泄流TDG过饱和问题的最优方式[10]。

（2）梯级水库群对鱼类生物多样性的不利影响持续存在。梯级水库群建设导致上游河道水文情势显著改变（包括流速降低、水温分层改变等）、鱼类洄游通道阻断、鱼类生境破碎化等问题持续存在，鱼类多样性显著降低。溪洛渡和向家坝电站运行后，绥江断面鱼类物种数由54种下降至35种[11]。2018年在长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区宜宾段的调查结果表明，原有36个产卵场中，功能部分退化、严重退化的占到了61%[12]。修建过鱼设施、建设保护区和人工产卵场、水库生态调度、生境替代等措施的综合采用，将是建设绿色水电和鱼类保护相结合的最好模式。

1.2 三峡库区水生态问题

三峡水库因防洪、发电等需要，其水位调节强度和频度都比较强烈，产生了一系列的水环境水生态问题。主要体现为库区消落带、支流回水区和库区本身3个方面。

（1）库区消落带水土流失与植被退化问题。消落带水位落差高达30 m、水淹时间长、反季节水位波动频繁，导致原有植被大规模退化，产生了较严重的水土流失问题。近年来通过一系列的生态修复与工程治理措施，消落带生态系统健康绝大部分呈现出逐年稳定与改善的趋势，但库首和库尾消落带治理仍需加强。

（2）库区支流回水区水华问题。三峡工程蓄水后，支流回水区因营养盐输入及水文情势的改变，即出现水华问题。改变库湾水动力及生境条件，三峡水库采用潮汐式生态调度，成为抑制库湾区水华的有效方式。但库区水华预测预警、支流水体营养盐控制仍需加强。

（3）库区鱼类生物多样性衰减问题。水库蓄水后，原有部分产卵场被淹没，库区鱼种资源不断减少。据调查，库区干流鱼种数由20世纪80年代的140—200种下降至2013—2015年的84种[13]。鱼类资源的衰减与恢复，仍需深入研究其成因及恢复机制。

1.3 中下游水生态问题

中下游地区水生态系统深受水利工程、河湖采

砂、围垦造田等人类活动的影响，其水生态问题突出表现为3个方面。

（1）河湖水文情势改变及对水生生态系统的不利影响。水库调蓄及其导致的河床下切改变了干流和通江湖泊的水文节律，对水生生态系统产生了重要影响。三峡水库运行后，坝下年径流总量降低了6%—10%，坝下年均输沙量减少了63%—80%。出库泥沙偏细，导致坝下河床冲刷下切，大通河段汛期同流量水位下降0.1—1 m。显著改变的河湖水文情势和水温体制，破坏了水生植物生长条件及鱼类洄游产卵和发育条件，并降低了水体自净能力。三峡水库坝下干流春季水位的快速上升影响湿生和挺水植物的萌发，导致水鸟和鱼类栖息地发生较大改变，从而影响鱼类和水鸟等动物资源。中游河道的堤防工程、裁弯取直工程、堵汊工程、洲滩种树工程，使得河道渠化，减少了水生生物的栖息地面积，水生生境异质性降低，降低水生生物多样性[13]。

（2）湖泊围垦破坏了水生生态系统的完整性。湖泊的不断围垦和泥沙淤积及沿湖建设，导致湖泊湿地面积不断萎缩、湖滨带功能退化，水生和沿岸植被衰退，降低了湖岸带污染物拦截和消减内源污染的能力，破坏了湖泊生态系统完整性。

（3）河湖采砂和航道整治对水生生物栖息地的破坏。河湖采砂和航道整治显著改变河湖水文地貌和水文过程，破坏了底部栖息地，对底栖动物和水生植物造成巨大影响。采砂导致的悬浮物浓度增加，降低了水体透明度，对浮游生物和水生植物都有较大影响。

1.4 典型通江湖泊的水生态问题

长江中下游浅水湖泊历史上均与干流相通，构成江湖复合生态系统，从而成为世界罕有的淡水物种资源库。但是，20世纪50年代以来，江湖筑坝建闸严重影响了江湖系统的侧向水文连通，只剩下洞庭湖、鄱阳湖保持通江状态。目前，洞庭湖、鄱阳湖受水利工程调蓄、湖泊围垦等人类开发行为的影响，湖泊湿地大规模丧失，江湖水沙交换关系和江湖水动力学特征发生较大改变，进而影响到湖泊水生态系统的完整性，造成生物多样性下降和湖泊水质下降等严峻的水生态问题，主要表现为4个方面。

（1）局部湖区藻华风险较高。鄱阳湖都昌、军山湖、康山湖、撮箕湖、战备湖等湖区水面均观测到大面积的蓝藻聚集。尤其是东部湖湾，相对其他湖区而言，水流较缓而总磷、总氮浓度较高，已发生多次水华聚集现象。东洞庭湖也因水流缓慢而面临较高的水华风险。

（2）沉水植被大幅度减少。受水面萎缩影响，通江湖泊部分湖区水生生境向陆生生境演替，沉水植被面积大幅缩减，群落结构简单化、多样性降低[14]。

（3）底栖动物多样性、完整性下降。鄱阳湖底栖动物优势种由大型软体动物逐渐演变成小型软体动物和昆虫类，多样性下降明显[15]；而洞庭湖底栖动物完整性也呈显著下降趋势[16]。

（4）干旱胁迫下鱼类和江豚受到威胁。全面禁渔之后，捕捞压力减小，鱼类资源量增加，江豚数量也呈上涨趋势。但受近年来频繁低枯水及旱涝急转影响，通江湖泊退水速率加快、水位骤降，使得部分来不及回退的江豚和鱼类滞留于低洼水体，干涸而死。

2 长江流域水生态调度主要实践与问题

三峡水库蓄水以来，科研人员即开始关注水库的生态调度问题。程根伟等[17]提出保持河流洪水节律、维持上下游输沙平衡、促进库区水量交换、实现防洪补偿调节的生态调度目标。郭文献等[18]从坝下河道环境流量、中华鲟产卵期水文水动力需求、四大家鱼产卵期需求进行了量化分析，讨论了三峡水库生态调度目标。2011—2020年，长江水利委员会在三峡水库共开展了14次促进坝下江段四大家鱼自然繁殖的生态调度试验。除2016年、2020年生态调度期间没有出现大规模繁殖以外，其他年份生态调度的实施对促进产漂

流性卵鱼类繁殖起到了积极的作用[19]。2020—2021年，汉江水利水电集团在丹江口-王甫洲区间开展了3次生态调度试验[20]，针对伊乐藻等沉水植物过度生长，在保障北调水量的前提下，采取加大下泄流量的方法，对沉水植被生长进行扰动，有效抑制了王甫洲库区的水草增长。

从三峡水库的生态调度实践看，其调度目标仍比较单一，仅考虑四大家鱼的产卵需求。实际上，除产卵外，鱼类资源恢复还必需足够大的饵料生物丰富的肥育水域。刚孵化的鱼苗必需到浮游动物丰富的缓流或静水环境，否则鱼苗到幼鱼（10—20 cm）的成活率相差成千上万倍。食性转换后的幼鱼、亚成鱼和成鱼摄食浮游生物、底栖动物或水生植物，其水文需求与饵料生物的类似，也需要流速较低的环境。因此，未来流域生态调度还应考虑以满足多数鱼类生活史全过程及所需饵料生物（主要是漫滩植物）的水文过程需求为目标。

3 长江模拟器的研发与河道水生态调度设想

3.1 长江模拟器的研发

长江模拟器，是指以长江流域为对象，以流域水循环为纽带，将自然过程与人文过程相耦合的流域模拟系统及科学装置。长江模拟器强调长江上、中、下游及湖库—岸线—城市群的互联互动，强调防洪、发电与水生生物保护等目标相结合的联合调度，以“了解过去长江、认识现在长江、展望未来长江”为目标，具有“监测—模拟—评估—预警—决策—调控”一体化功能。经过近5年的探索，基本形成了长江模拟器建设的系统框架（图1），并从感知体系、模拟体系和服务体系建设着眼，形成了长江模拟器的初代产品。

在感知体系建设方面，初步形成了流域空天地一体化监测监控体系。研发了基于连续精细吸收光谱的接触式水下原位水质探测系统和基于反射式高光谱成像技术的空、地基水质探测系统，目前已在三峡库区香溪河站和鄱阳湖区实现了实时水质指标的在线连续高频观测。采用遥感解译的方式，获取了鄱阳湖、洞庭湖、太湖、洪湖1987—2021年长序列水质时空变化数据，获取了武汉、重庆、上海、长沙等典型城市黑臭水体数据，制作了长江干流水质月尺度解译产品，获取了近40年来长江干流岸线的时空变化数据。与环境监测部门初步建立了数据共享合作机制，联合打造长江流域水生态水环境监测信息平台。

在模型体系建设方面，构建了长江干流水系统综合模拟与调控平台。发展了流域分布式生态水文模拟模型、流域面源污染模拟模型、三峡水库水动力-水质-调度耦合模型、长江中下游干流水动力-水质耦合模型、鄱阳湖及洞庭湖二维水动力模型、长江干流典型河段水生态模拟模型、长江干流典型城市水系统模型等专业模型。专业模型耦合模拟的精度得到了检验[8]，在清溪场、万县、城陵矶、汉口、湖口、大通6个关键断面，流量、水位模拟的纳什效率系数达到0.70以上，模型耦合模拟精度达到了预期。

在各专业模型的开发基础上，研发了长江模拟器软件平台，分专业版和决策版（图2）。软件平台专业版中，各模型既可独立运行，也提供各模型耦合模拟定制化环境。软件平台决策版中，实现了长江模拟器“监测—模拟—评估—预警—决策—调控”一体化功能，已开发了监测监控、面源污染、水循环、水生态、岸线、城市群、调控决策7个模块。监测监控模块中，实现了项目示范区和三个湖泊试验站实时在线水质监测数据的接入展示，接入了全流域水文实时监测数据。水循环模块中，模拟分析了近40年和未来30年全流域水文循环的时空变化特征；基于15天短期天气预报数据，实现了流域水文情势的滚动预报，可预报各水文响应单元的产流、土壤湿度、蒸散发变化，预报干支流关键断面的流量、水位变化，预报鄱阳湖、洞庭湖的水情变化。湖库模块中，模拟了洞庭

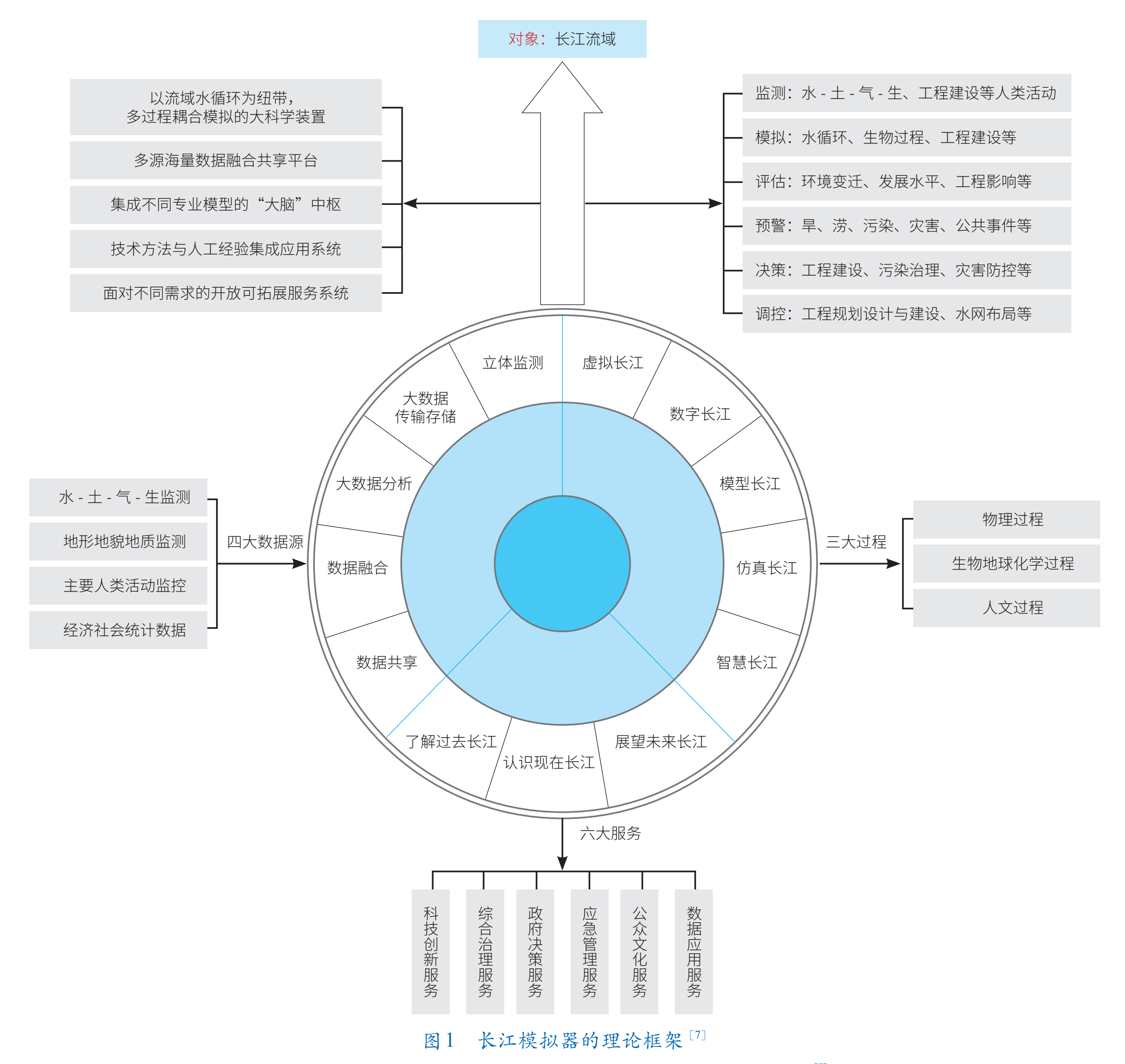


图 1　长江模拟器的理论框架[7]

Figure 1　Theoretical framework of Yangtze River Simulator[7]

湖、鄱阳湖近40年和未来30年湖泊水文水动力过程，并可模拟鄱阳湖建闸的水文情势变化及其对候鸟栖息地的影响。岸线模块中，获取了中下游干流陆向和水向岸线质量演变特征；建立了基于旗舰物种江豚生境需求的水向岸线质量评估模型；建立了陆向岸线污染物拦截空间配置模型，确立了不同类型的陆向岸线的空间配置方案，并应用于长江流域国土空间配置规划。水生态模块中，建立了典型河段的水文-水动力-食物链关系模型，联合流域水文模型、三峡调度模型、干流水动力模型，首次确立了考虑水生生物食物链需求的三峡水库生态调度方案。城市水系统模块中，实现了长江中游城市群、成渝城市群的降雨—产流—用水—排水—产污过程耦合模拟；针对典型城市（重庆、武汉）开展了城市化的水文效应模拟、城市内涝模拟；针对基于未来24 h逐时天气预报数据，实现了武汉市建成区内涝趋势的滚动预报，并可应用于

长江流域各级城市。决策调控模块中，建立了流域绿色发展评价模型，评估地级市尺度的绿色发展不同维度的时空差异，提出地级市尺度的绿色发展调控方案，并可模拟分析不同调控方案下流域面源污染的可能变化及其对干流水质变化的可能贡献。

在服务体系研发方面，针对公众服务、数据应用、政府决策、综合治理技术等方面开展了工作。开发了长江模拟器公众版小程序，为公众宣传与公众参与长江大保护奠定了基础；建设了长江模拟器综合数据库，支撑长江模拟器专业版、决策版、公众版平台，并为长江流域科学数据共享服务打下了基础；政府决策服务方面，通过咨询报告等为行业及区域管理提供了重要的决策咨询建议；流域综合治理技术服务方面，构建了典型湖泊/湖区水生态修复关键技术、城市水环境水生态综合治理关键技术、长江干流岸线生态修复及调控技术等，初步形成了长江模拟器的服务体系。

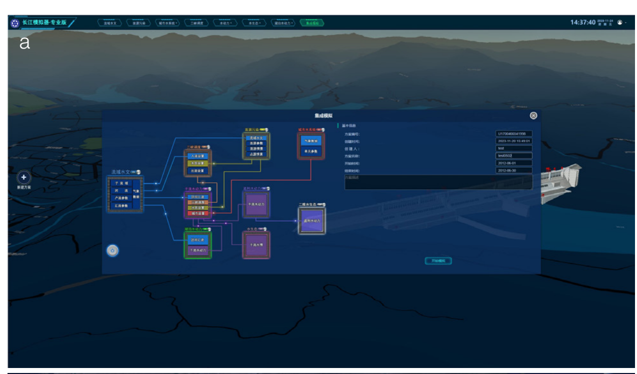




图2　长江模拟器专业版（a）与决策版界面（b）示意

Figure 2　Sketch map for professional version (a) and Design Support version (b) of Yangtze River Simulator

长江模拟器服务于科研用户、公众和政府决策的研发理念及其研发进展，得到了重庆市政府的认可。在中国科学院与重庆市政府战略合作协议框架下，重庆市政府将长江模拟器落地建设作为支撑重庆和整个长江流域生态文明建设的科技利器。支持长江模拟器研发与落地建设写入了2021年3月重庆市政府印发的《重庆市国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》和2022年重庆市政府印发的《重庆市科技创新“十四五”规划（2021—2025年）》，双方将争取把长江模拟器打造为流域信息综合集成平台、流域水系统演变模拟平台、流域综合调控管理决策支持平台，成为生态环境领域又一个国家级重大科技基础设施。

3.2 长江模拟器的水生态调度设计

在长江模拟器研发过程中，考虑了两个大型通江湖泊洞庭湖、鄱阳湖的生态水位需求，干流河道典型江段底栖动物、鱼类、漫滩植被对河道水文节律（流量、流速）的响应关系，河口压咸流量需求，以防洪、发电、航运需求为约束条件，以现有三峡水库调度方案为基础，建立了三峡水库生态调度模型。设置了6种水库出库控制方式，包括假设无库、现有优化调度方式、规划设计调度方式、坝前水位控制方式、下泄流量控制方式、生态调度方式。通过三峡水库不同调度方式与流域分布式水文模型、流域面源污染模型、干流水动力水质模型、通江湖泊水动力模型、河道水生态模型联合模拟，模拟分析不同调度方式下干流及通江湖泊水质、水文、水生态过程的变化特征，以及水生生物生境的可能变化及食物链的不同响应，从而确定三峡水库适宜的水生态调度方案。

4 基于长江模拟器的干流河道水生态调度研究

4.1 干流河道水生态调度模型构建

长江模拟器的干流河道水生态调度模型，以生态

系统服务目标所需的水文周期波动过程为基础，从现阶段的流量目标静态化转向为动态化，从刺激四大家鱼产卵向满足鱼类全生活史过程需求转变。该调度模型由长江模拟器中的流域水文模型、三峡水库调度模型、干流一维水动力模型、典型江段二维水动力模型和多个典型河段水文-食物网模型联合模拟完成，具体流程见附录。模型输入参数为三峡水库出库周年日流量，输出参数为多个典型河段基础生物（湿生植物、挺水植物、浮游植物、浮游动物和底栖动物）资源量、鱼类资源量和江豚潜在数量。基础生物资源量估算，基于各基础生物对水流生境因子（水深、流速）的需求，结合典型河段二维水动力模型得出基础生物适宜面积，该面积乘以生物量得到河段基础生物的资源量。通过比较不同方案的模拟结果，分析环境变化下河道水生态效应，即高级生物对水文、栖息地等环境条件的需求，并用于优化三峡水库的生态调度。

4.2 基于三峡调度下的干流河道水生态模型应用

（1）三峡水库蓄水后实际运行方式的水生态效应模拟。本研究模拟分析了无库和有库条件（实际运行模式）下干流河段水生生物的响应。与无库情形相比，三峡水库实际运行方式会导致鱼类和江豚数量减少2.8%（0.5%—4.9%）、湿生植物资源量减少3%（0—5.8%）、挺水植物减少5%（0.4%—8%）、底栖动物减少0.6%（0—2.2%）、浮游生物影响不大。主要原因是枯水期（2—3月）为满足航运需求增高水位，导致漫滩湿生植物萌发面积减小；汛前消落期（5月25日—6月10日）短期内大量放水（6月10日库水位降至145 m），导致河道水位快速升高，不利于漫滩湿生植物生长。此外，三峡出库泥沙偏细，导致中下游河床冲刷加剧，底质不稳定，底栖动物资源量减少，也是影响鱼类资源的一个重要因素。

（2）提出了三峡水库生态调度可行的最佳参数。① 通过对不同调度方案进行比选，在满足防洪和航运需求的前提下，考虑干流河段水生生物与河流水文情势之间的关系，初步确定了三峡水库生态调度的基本参数（图3）。2—3月下泄流量为6 000—7 000 m^3/s，可满足航运需求（航运最低需求为6 000 m^3/s），同时应尽量保持低流量，以使漫滩植物有足够的萌发面积；4月下泄流量区间保持为7 000—8 000 m^3/s、5月为8 000—13 000 m^3/s、6月为13 000—18 000 m^3/s，既可满足防汛需求，也对水生生物影响较小。其中，4月15日—6月15日，三峡防汛腾库时，应尽可能地慢速腾库容（日增小于160 m^3/s），使湿生植物有足够的生长期；5—6月，水温达到18℃—30℃（最适18℃—24℃）时，制造洪峰以满足四大家鱼产卵需求，日涨水量大于2 000 m^3/s，涨水次数约5次，总涨水量大于10 000 m^3/s（短期的持续涨水对漫滩植物不会造成很大影响）。本方案已经向长江水利委员会和三峡水利枢纽梯级调度通信中心作了专门汇报。② 目前确立的三峡水库生态调度方案，除考虑鱼类产卵需求外，还考虑了鱼类全生活史各个阶段的水文过程需求。春末夏初，制造洪峰促进产漂流性卵鱼类产卵，鱼卵孵化后形成的仔稚鱼需要到缓流区（流速<0.03 m/s）（河漫滩、通江湖泊等）摄食浮游动物，此时淹没的植物可营造低流速的生境。食性转换后的幼鱼、亚成鱼和成鱼摄食浮游生物、底栖动物或水生植物，也需要流速较低的环境。对于产粘性卵鱼类（如鲤、鲫、翘嘴鲌）需要植物体、砂石等作为粘卵基质，若产卵期水体没有合适的基质，则需要水位上升以便亲鱼到水陆交错区产卵。因此，若要提高鱼类总资源量，生态调度需满足鱼类全生活史各个阶段的需求。

5 通江湖泊典型水情模拟及生态效应

通江湖泊水动力模型，基于通江湖泊精细地形高程和出入流流量水位等输入信息，能够反映通江湖泊与长江之间的出流、顶托和倒灌作用，模拟湖泊流域和长江来水共同作用下的湖泊水动力变化，刻画水面动态的干湿变化过程。可应于不同气候变化和人类活

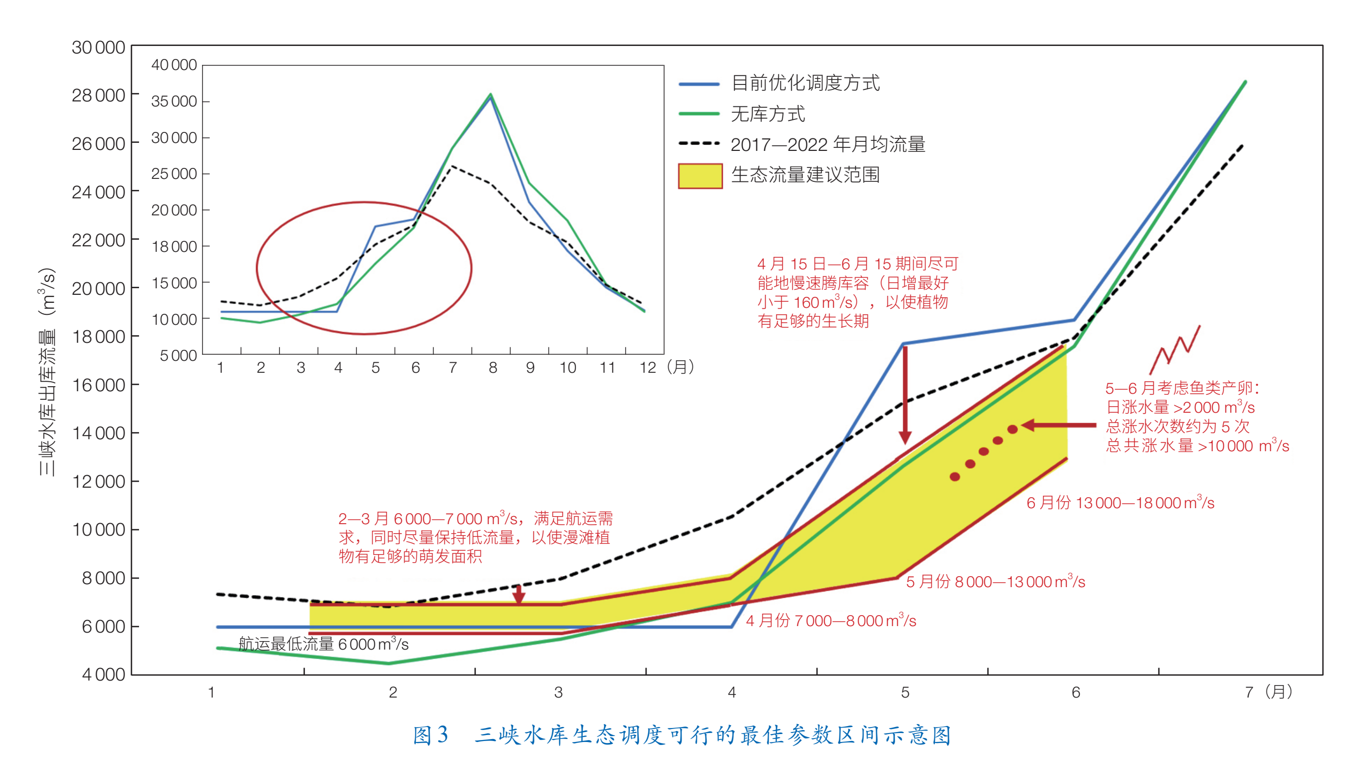


图 3　三峡水库生态调度可行的最佳参数区间示意图

Figure 3　Optimized parameters for ecological operation of Three Gorges Reservoir

动影响下，江湖关系变化对通江湖泊水动力的影响，捕捉典型水文年、典型水文阶段的湖泊水动力场，为湖泊水生态和湿地生态研究提供湖泊水文水动力要素时空变化数据集。以鄱阳湖为例，2006年枯水期水深时空分布模拟结果，很好地刻画了鄱阳湖河道深水、洲滩浅水以及北部深、南部浅的分布格局（图4）。湖泊水动力场的精细模拟，可用于航道规划、候鸟和其他水生生物栖息地适宜性评估。

5.1 通江湖泊水利枢纽工程调控效应

近20年来，鄱阳湖枯水位降低、枯水期提前、枯水历时延长等问题日益凸显，并表现为常态化、趋势化。建设鄱阳湖水利枢纽工程，被当地认为是一个“根本性”解决方案。为满足鄱阳湖拟建水利枢纽工程的影响评估需求，鄱阳湖水动力模块专门增加了枢纽功能的定义与边界刻画，可分别进行现状条件和建闸情况下的评估计算。

考虑水利枢纽有效增加水资源的同时，需关注流速降低、换水周期延长等可能带来的水环境风险。本研究选取2011年（枯水年）、2016年（丰水年）和2017年（平水年）3个典型年份，开展了建闸前后湖泊水文水动力变化评估。从影响时段看，9月蓄水期和退水初期影响最大，枯水年全湖平均水位建闸后相比建闸前提升了1.52 m，丰水年平均水位提升了1.07 m；12月份水位平均提升幅度均小于0.5 m。从空间影响来看，建闸主要影响湖区北部、中部及东部，对湖区西部和南部影响较小。对水动力的影响主要集中在河道区，河道流速整体减小，闸前流速降幅较大；洲滩区域，本身流速偏小、流向不定，对水利枢纽的响应不如河道区敏感。

5.2 通江湖泊候鸟栖息地潜在生境模拟

候鸟栖息地潜在生境模型以通江湖泊水动力模型为基础，基于湖泊水动力模型输出的水深计算结果，通过设定水深阈值，自动提取候鸟潜在生境。通江湖泊候鸟栖息地水深阈值设置为50 cm，基本包含了通

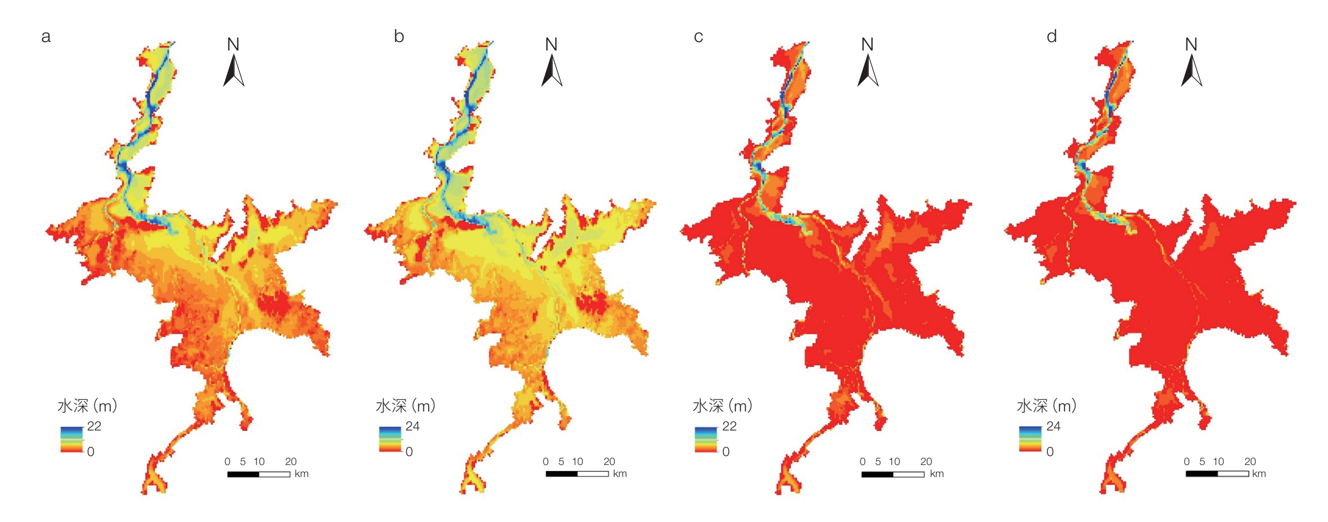


图 4　长江模拟器模拟的2006年鄱阳湖枯水期水深分布

Figure 4　Spatial distributions of water depths of Poyang Lake during the low water level period in 2006 simulated by Yangtze River Simulator

（a）2006年1月15日；（b）2006年2月15日；（c）2006年11月15日；（d）2006年12月15日

(a) January 15, 2006; (b) February 15, 2006; (c) November 15, 2006; (d) December 15, 2006

江湖泊所有候鸟类型栖息地适宜的水深。考虑通江湖泊候鸟的迁徙和停留时间，主要计算时段为每年的1—2月和11—12月，同时兼顾适宜水深的持续时间。基于不同典型年、不同水情条件的水动力模拟结果，可计算相应条件下全年潜在适宜的候鸟栖息地空间分布及变化情况。

以2006年为例，鄱阳湖适宜候鸟的潜在栖息地空间主要分布在湖区中部河口、自然保护区及浅水湖湾（图5a），模拟结果与以往报道相符。水利枢纽建成运行后，水深条件发生变化，潜在栖息地空间分布格局发生了相应调整，其中湖区中部和东部面积略有减少，西部面积大为增加（图5b）。即针对极端枯水年，建闸后的水位抬升，使得原本部分干涸滩地淹没成为浅水洲滩，可有效增大候鸟栖息地适宜范围。

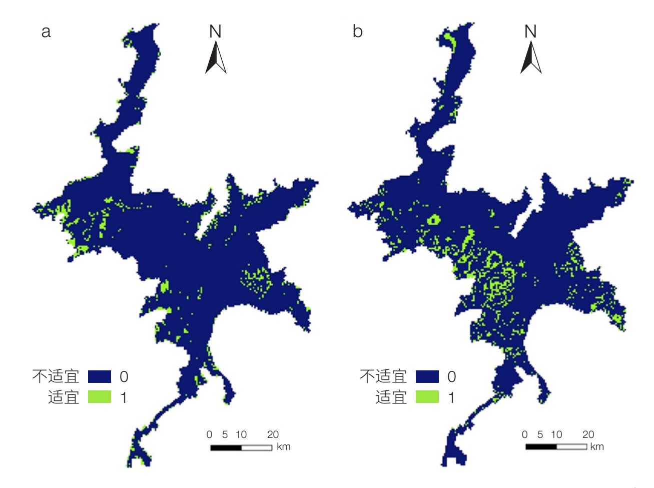


图 5　长江模拟器模拟的2006年鄱阳湖适宜候鸟的潜在栖息地空间分布（绿色为适宜单元）

Figure 5　Spatial distributions of potential suitable habitats for migrant birds in Poyang Lake in 2006 simulated by Yangtze River Simulator (green for suitable habitats)

（a）现状条件；（b）水利枢纽运行后

(a) without Poyang Lake Hydraulic Project; (b) with Poyang Lake Hydraulic Project

6 小结与建议

6.1 小结

长江模拟器考虑大型水库调度对下游河道和通江湖泊水文情势的影响，构建了基于能流-食物链关系的河道水生态模型，可评估不同调度方式下河道水生生物的响应，首次建立了考虑河道鱼类生长史全过程水

文需求的三峡水库生态调度方案，深化了三峡生态调度的内涵。但三峡调度涉及防洪、发电、航运、生态、环境等多个方面，涉及多部门之间沟通合作问题，模型开发中发电和航运调度模块相对简单，未来需要进一步深化。而三峡以上梯级水库的联合调度，如何在考虑防洪、发电的基础上，进行逐级的生态调度实践，既需要梯级水库水量的联合调度，也需要针对具体河段的水生生物的基本需求和水生态保护目标，需进一步深入研究，开发相应的水动力-水生态耦合模拟模块。

长江中下游通江湖泊的水生态问题，还受下游流域多个水利工程的综合作用，需要开展三峡水库与下游水利工程的联合生态调度深度研究。例如鄱阳湖的水生态调度，不仅仅涉及三峡调度，也涉及赣江流域上游水利工程的联合调度。在通江湖泊水动力模型研发基础上开发的候鸟栖息地适宜性评估模型，可模拟分析不同调度方式和建闸与否对通江湖泊水文情势和候鸟栖息地的可能影响。目前湖泊模型尚缺乏水动力-水质耦合模拟能力，尚不能模拟分析水动力环境改变对湖泊水质影响的时空分异特征，水生态过程的模拟也仅仅考虑了候鸟栖息地，相对简化。未来湖泊水动力-水质-水生态耦合模拟将是一个重要方向，可在目前水情预测的基础上，扩展通江湖泊水动力模型的功能和应用领域。而处于面源污染模型下游的通江湖泊水质模拟有赖于面源污染模拟的精度。长江模拟器初步开发了流域面源和点源污染模拟模型，可精细表达径流路径差异对污染物迁移过程的影响，识别污染物关键源区和关键时段，能直接对接管理防控需求，但限于水质监测资料的共享限制、点源污染源精细分布空间信息掌握不足，其模拟精度还有很大的提升空间。

当前研发的长江模拟器，只能算是大型流域模拟的初代装置，与规划的目标与理论框架之间的距离还很远。长江模拟器在水生态调度方面的能力提升，还需要在描述能力、计算能力、大数据汇聚和处理能力、人文过程模型化、调控决策智慧化等方面加大力度。在科技创新领域，专业模型和模块的不断发展完善，将是长江模拟器研发面临的长期任务。在流域综合治理与政府决策辅助方面，要发展针对不同部门、不同层级的应用实例，深入把握用户需求，完善应用功能开发。在公众教育与参与领域，进一步理解公众需求，针对性开发公众版相关功能，是长江流域生态保护需要开展的一项重要工作，也是长江模拟器的重要使命。

6.2 建议

长江模拟器研发过程中，《中华人民共和国长江保护法》颁布实施，我们深刻体会到部门和政府间协调、流域统筹在长江流域生态保护中的重要性，而缺乏强有力的科技支撑，是长江流域水生态保护面临的关键问题。

（1）建议尽早将长江模拟器列入国家重大科技基础设施建设。发挥科技创新的引领作用，是推动长江流域系统治理与绿色发展的关键。流域模拟器已成为国际水文协会（IAHS）第3个十年计划的重要创新方向。长江模拟器是国际上首个大型流域模拟装置，有中国科学院、高校、部门研究机构等10余家研究单位参与，是科教资源优化组合和协同创新配合的重要体现，提升了流域水系统科学的原始创新能力。长江模拟器基于流域水系统综合监测信息，可实现对流域水系统不同时段和不同子区域水系统状态的有效诊断和评价；通过对流域人文和自然过程的耦合模拟，综合考虑流域上下游、左右岸、干支流、城市乡村、工程措施与非工程措施等的影响，有助于实现流域“源头治理”与“系统治理”相结合，采用标本兼治的方法系统解决流域水环境问题，促进流域绿色可持续发展。国家在支持长江模拟器重大基础设施建设中，可依托长江模拟器建成长江流域科学数据中心，实现不同行业、不同类型数据的互联互通，打破行业数据共

享壁垒；通过耦合不同的监测技术、模型方法、治理及灾害管理技术等，实现跨越不同行业和部门的模型融合，打造一个具有开放性和可拓展性的耦合集成大科学装置，提升流域水系统科学研究的创新能力，服务于长江经济带高质量绿色发展。

（2）建议开展三峡水库、上游水库以及两湖流域水库的联合生态调度研究和实验。考虑到三峡生态调度对两湖影响具有较强的时空异质性，在东洞庭湖和鄱阳湖北部等区域效果相对显著，但短期的作用效果有限，建议开展三峡水库、上游及两湖流域水库的联合生态调度研究和实验。此外，两湖大范围的洪泛洲滩湿地作为产粘性卵鱼类产卵场和越冬候鸟重要栖息地，会随着水体淹没或出露动态变化，开展生态调度时，洲滩面积及水位变化情况也需要密切关注。未来联合生态调度对水文连通、水体交换和水环境等影响叠加的生态效应研究仍需要深化。

（3）尽快依托长江模拟器开展面向鱼类和江豚保护的三峡水库生态调度试验。“长江模拟器”已耦合三峡调度模型、长江中下游干流一维水动力模型及典型江段水文-水动力-食物网模型、湖泊水动力模型和候鸟栖息地潜在生境模型，可作为依托开展长江流域的生态调度试验。但因河流、水库高精度水下地形数据分散且难以获得，故建议整合全国优势力量，集中研发“水文-水动力-食物网”模型，为持续完善生态调度工作提供科学支撑。

参考文献

1 Sato T. The earth simulator: Roles and impacts. Parallel Computing, 2004, 30(12): 1279-1286.

2 Dunne J P , John J G, Adcroft A J, et al. GFDL's ESM2 global coupled climate–carbon earth system models. Part I: Physical formulation and baseline simulation characteristics. Journal of Climate, 2012, 25(19): 6646-6665.

3 Caldwell P M, Mametjanov A, Tang Q, et al. The DOE E3SM coupled model version 1: Description and results at high resolution. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2019, 11(12): 4095-4146.

4 Beusch L, Gudmundsson L, Seneviratne S I. Emulating Earth system model temperatures with MESMER: From global mean temperature trajectories to grid-point-level realizations on land. Earth System Dynamics, 2020, 11(1): 139-159.

5 曾庆存, 林朝晖. 地球系统动力学模式和模拟研究的进展. 地球科学进展, 2010, 25(1): 1-6.
Zeng Q C, Lin Z H. Recent progress on the earth system dynamical model and its numerical simulations. Advances in Earth Science, 2010, 25(1): 1-6. (in Chinese)

6 于贵瑞, 张黎, 何洪林, 等. 大尺度陆地生态系统动态变化与空间变异的过程模型及模拟系统. 应用生态学报, 2021, 32(8): 2653-2665.
Yu G R, Zhang L, He H L, et al. A process-based model and simulation system of dynamic change and spatial variation in large-scale terrestrial ecosystems. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(8): 2653-2665. (in Chinese)

7 夏军, 占车生, 曾思栋, 等. 长江模拟器的理论方法与实践探索. 水利学报. 2022, 53(5): 505-514.
Xia J, Zhan C S, Zeng S D, et al. Theoretical method and practical exploration of Yangtze River Simulator construction. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(5): 505-514.

8 Yang L H, Zeng S D, Xia J, et al. Effects of the Three Gorges Dam on the downstream streamflow based on a large-scale hydrological and hydrodynamics coupled model. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022, 40: 101039.

9 王洪铸. 长江流域水生态环境整体保护战略刍议(代序言). 水生生物学报, 2019, 43(S1): 1-2.
Wang H Z. On the overall protection strategy of water ecological environment in the Yangtze River Basin (preface). Acta Hydrobiologica Sinica, 2019, 43(S1): 1-2. (in Chinese)

10 Ma Q, Li R, Feng J J, et al. Ecological regulation of cascade hydropower stations to reduce the risk of supersaturated total dissolved gas to fish. Journal of Hydro-environment Research, 2019, 27:102-115.

11 王俊, 苏巍, 杨少荣, 等. 金沙江一期工程蓄水前后绥江段

鱼类群落多样性特征. 长江流域资源与环境, 2017, 26(3): 394-401.

Wang J, Su W, Yang S R, et al. Variation characterristics of fish biodiversity in Suijiang section before and after impoundment of first phase of Jinsha River hydropower project. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(3): 394-401. (in Chinese)

12 孟宝, 张继飞, 叶华, 等. 长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区鱼类产卵场功能现状分析及保护启示. 长江流域资源与环境, 2019, 28(11): 2772-2785.

Meng B, Zhang J F, Ye H, et al. Current situation and protection enlightenment of the function of fishing spawning grounds in the national nature reserve for the rare and endemic fishes, upper reaches of the Yangtze River. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(11): 2772-2785. (in Chinese)

13 王洪铸, 刘学勤, 王海军. 长江河流泛滥平原生态系统面临的威胁与整体保护对策. 水生生物学报, 2019, 43(S1): 157-182.

Wang H Z, Liu X Q, Wang H J. The Yangtze River-floodplain ecosystem: Multiple threats and holistic conservation. Acta Hydrobiologica Sinica, 2019, 43(S1): 157-182. (in Chinese)

14 胡振鹏, 林玉茹. 鄱阳湖水生植被30年演变及其驱动因素分析. 长江流域资源与环境, 2019, 28(8): 1947-1955.

Hu Z P, Lin Y R. Analysis of evolution process and driving factors for aquatic vegetations of Poyang Lake in 30 years. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(8): 1947-1955. (in Chinese)

15 董芮, 王玉玉, 吕偲, 等. 水文连通性对西洞庭湖大型底栖动物群落结构的影响. 生态学报, 2020, 40(22): 8336-8346.

Dong R, Wang Y Y, Lü C, et al. Effects of hydrological connectivity on the community structure of macrobenthos in West Dongting Lake. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(22): 8336-8346. (in Chinese)

16 王丑明, 黄代中, 张屹, 等. 1988—2021年洞庭湖大型底栖动物完整性评价及环境压力影响分析. 湖泊科学, 2023, 35(5): 1765-1773.

Wang C M, Huang D Z, Zhang Y, et al. Assessment of integrity of macrobenthos in Lake Dongting (1988 – 2021) and impacts from environmental stress. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(5): 1765-1773. (in Chinese)

17 程根伟, 陈桂蓉. 试验三峡水库生态调度,促进长江水沙科学管理. 水利学报, 2007, (S1): 526-530

Cheng G W, Chen G R. Ecological operating experiment for Three-Gorge Reservoir, creating healthy stream environment for Changejiang River. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(S1): 526-530. (in Chinese)

18 郭文献, 夏自强, 王远坤, 等. 三峡水库生态调度目标研究. 水科学进展, 2009, 20(4): 554-559.

Guo W X, Xia Z Q, Wang Y K, et al. Ecological operation goals for Three Gorges Reservoir. Advances in Water Science, 2009, 20(4): 554-559. (in Chinese)

19 徐薇, 金瑶, 陈桂亚, 等. 三峡水库十年生态调度(2011—2020年)期间下游沙市江段产漂流性卵鱼类自然繁殖变化. 湖泊科学, 2023, 35(5): 1729-1741.

Xu W, Jin Y, Chen G Y, et al. Changes of natural reproduction of fish producing drifting eggs in downstream Shashi section, middle reaches of Yangtze River during the ten-year (2011 – 2020) ecological operation of Three Gorges Reservoir. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(5): 1729-1741. (in Chinese)

20 丁洪亮, 程孟孟, 胡永光, 等. 丹江口-王甫洲区间生态调度认识与实践. 人民长江, 2022, 53(3): 74-78.

Ding H L, Cheng M M, Hu Y G, et al. Understanding and practice of ecological operation in Danjiangkou-Wangfuzhou section in Hanjiang River. Yangtze River, 2022, 53(3): 74-78. (in Chinese)

Ecological operation in Yangtze River basin with Yangtze River Simulator

XIA Jun[1,2] LIN Zhonghui[2*] ZHAN Chesheng[2] GAO Wenjuan[3] LI Yunliang[4] YAO Jing[4] ZENG Sidong[5] HUANG Renyong[6] WANG Hongzhu[3]

（1 State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2 CAS Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3 State Key Laboratory of Fresh Water Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China;

4 Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

5 Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China;

6 Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China）

Abstract Ecological protection and green development in the Yangtze River basin are critical to the ecological construction of a Beautiful China. This study analyzes the current situation and main problems of the water ecology in the Yangtze River basin, and introduces the development of the Yangtze River Simulator, and the design for the ecological operation of the Three Gorges Reservoir, the main river, and the lakes connected to the river. Through the simulation of the main stream water ecology and lake water ecology by the Yangtze River Simulator, the optimization plan for the ecological regulation of the Three Gorges Reservoir was obtained, and specific suggestions for the ecological regulation of the Three Gorges Reservoir and the development of river simulator in future are put forward.

Keywords Yangtze River basin, Yangtze River Simulator, water ecology, ecological operation

夏 军 中国科学院院士，挪威科学院外籍院士。武汉大学水安全研究院院长，教授。主要研究领域包括：系统水文学、水资源可持续利用、生态水文、气候变化影响与适应性水管理。E-mail: xiajun666@whu.edu.cn

XIA Jun Academician of Chinese Academy of Sciences (CAS); Foreign Member of the Norwegian Academy of Sciences; Professor and Director of the Research Institute for Water Security at Wuhan University, China. His main research areas include system hydrology, sustainable utilization of water resources, eco-hydrology, and climate change impact and adaptive water management. E-mail: xiajun666@whu.edu.cn

林忠辉 中国科学院地理科学与资源研究所副研究员。主要研究领域：生态水文。E-mail: linzh@igsnrr.ac.cn

LIN Zhonghui Associated Professor of Institute of Geographic Sciences and Resources Research, Chinese Academy of Sciences (CAS). His main research field is focused on eco-hydrology. E-mail: linzh@igsnrr.ac.cn

■责任编辑：张帆

*Corresponding author